

Este ser é até o momento o único terrestre que distingue luz polarizada circularmente. Ele é o camarão gafanhoto. Ele consegue distinguir 100.000 cores diferentes 10 vezes mais que o homem.

Alexandre Suaide

Ed. Oscar Sala

sala 246

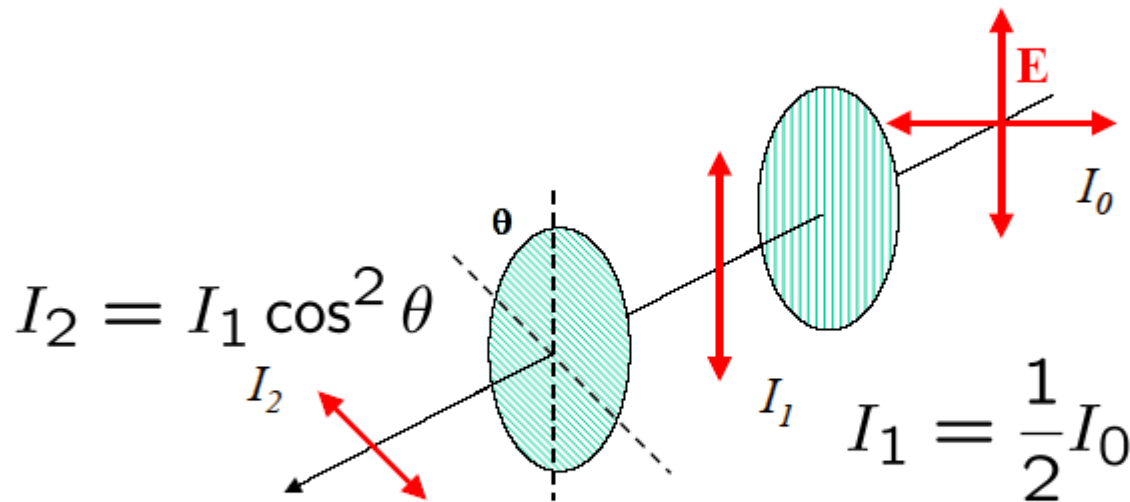
ramal 7072

Física Experimental IV - 12ª aula

<http://www.dfn.if.usp.br/~suaide/>



Lei de Malus

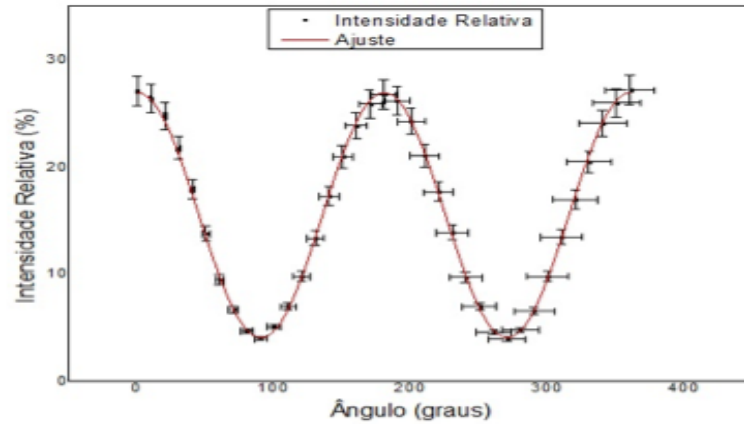


$$\Rightarrow I_2 = \frac{I_0}{2} \cos^2 \theta$$

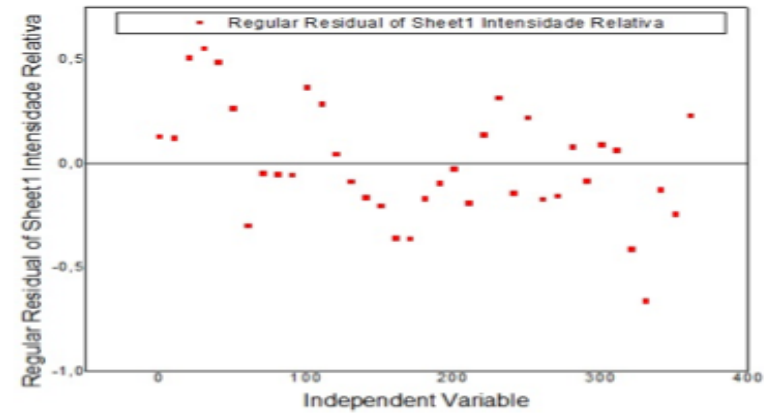
$$y(x) = A \cos^2(x) + y_0 \quad (2)$$

Em que a variável x está em graus.

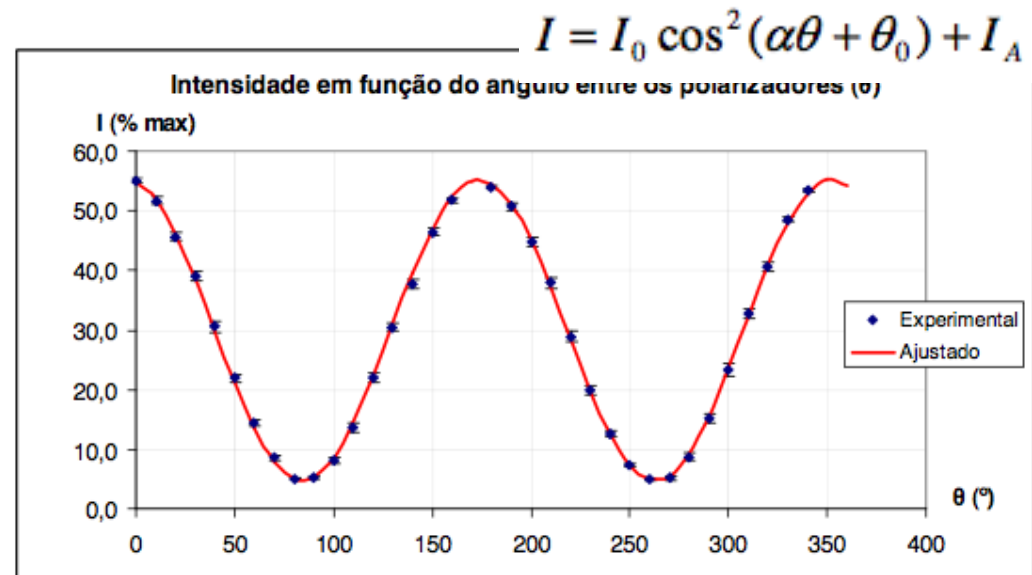
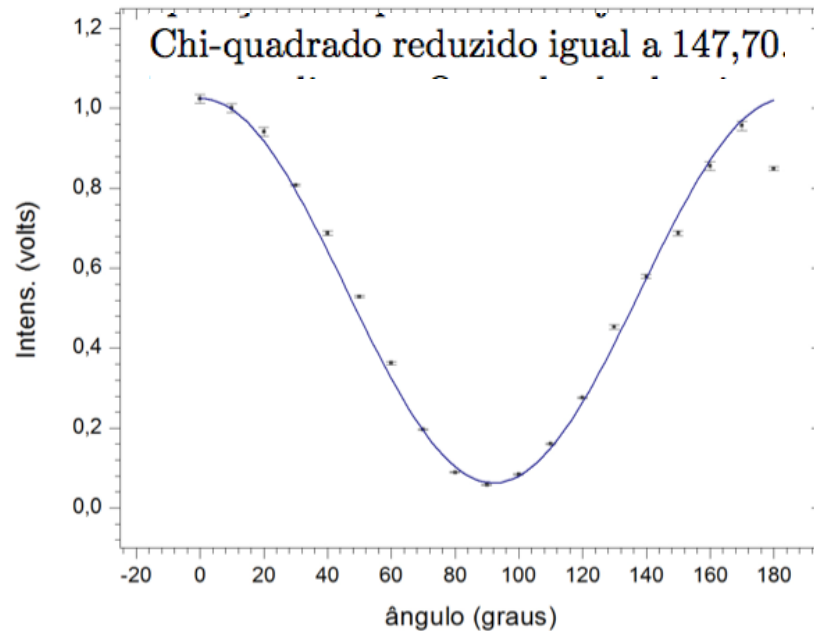
O resultado do ajuste está disposto a seguir:



(a) Ajuste.



(b) Resíduos.



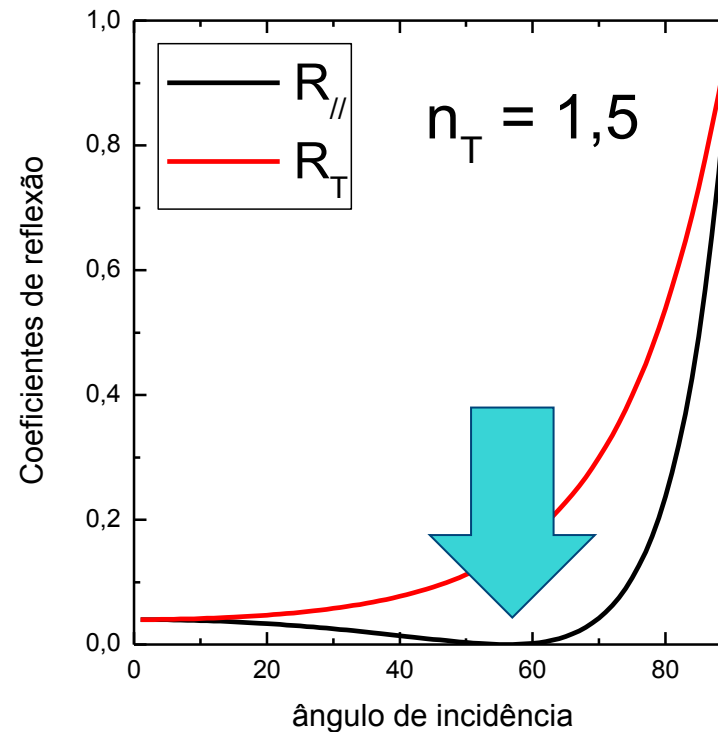
Polarização por reflexão

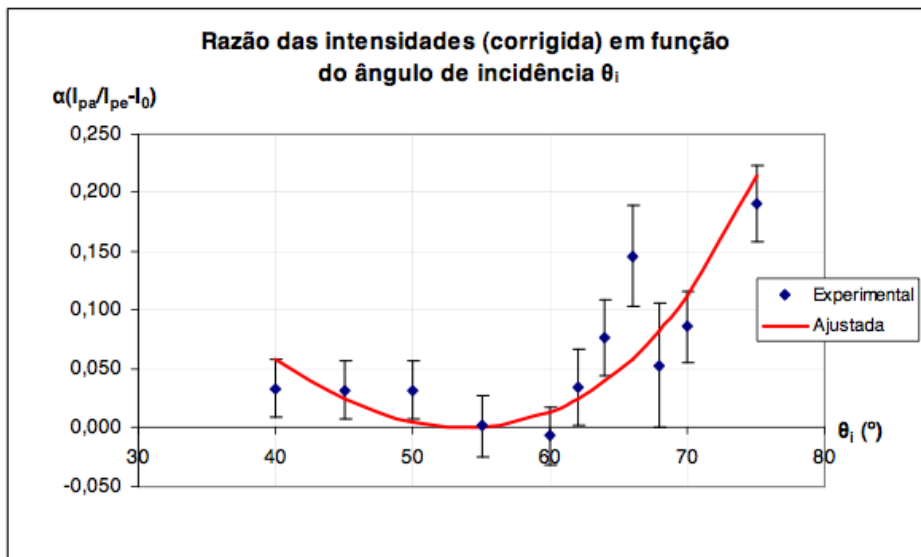
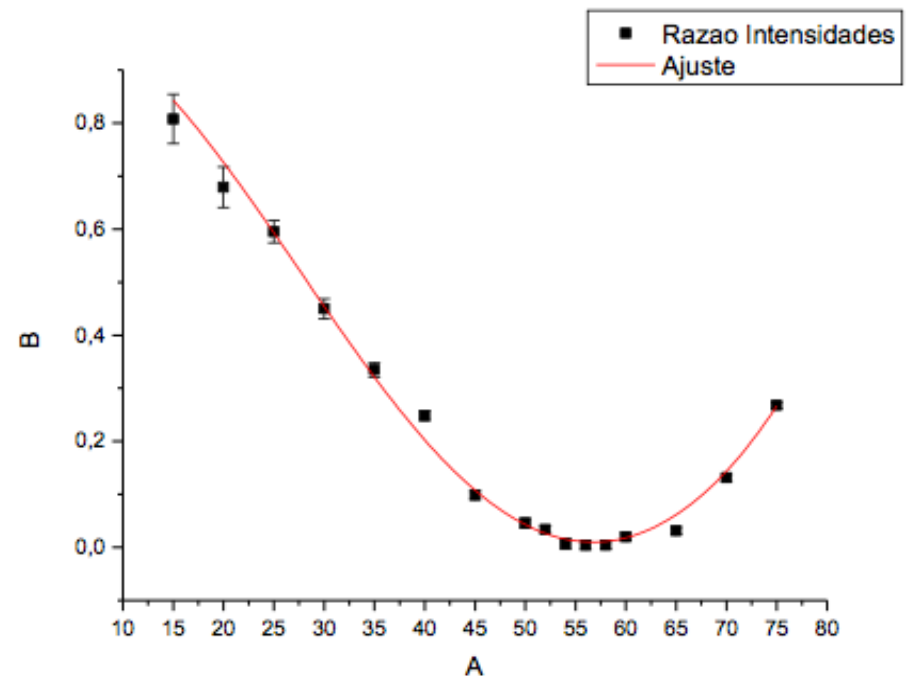
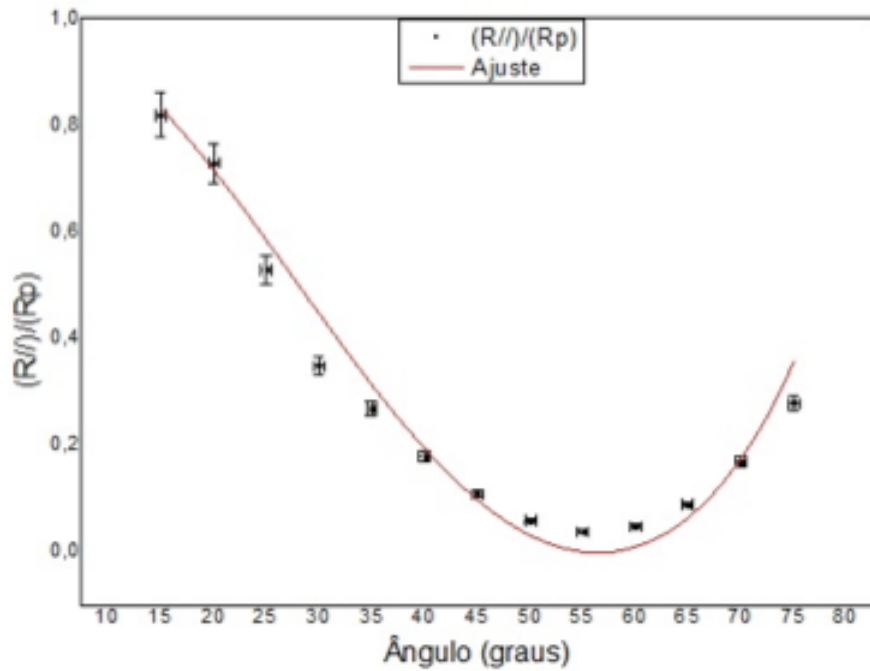
- O ângulo no qual a luz refletida é totalmente polarizada é chamado:
 - Ângulo de Brewster

$$n_t = \tan \theta_B$$

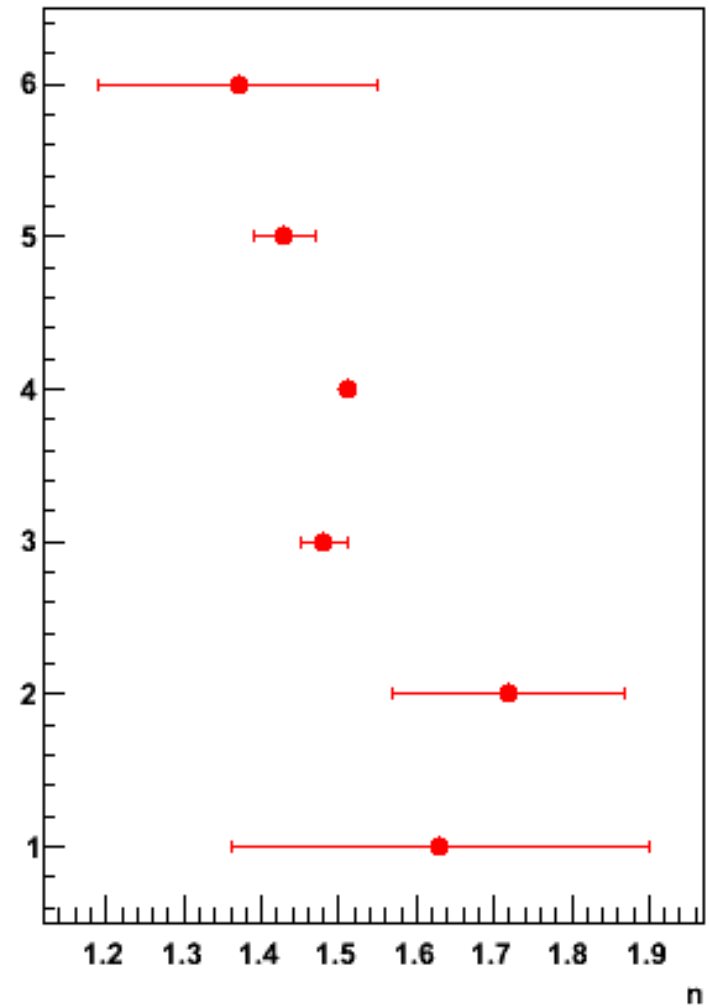
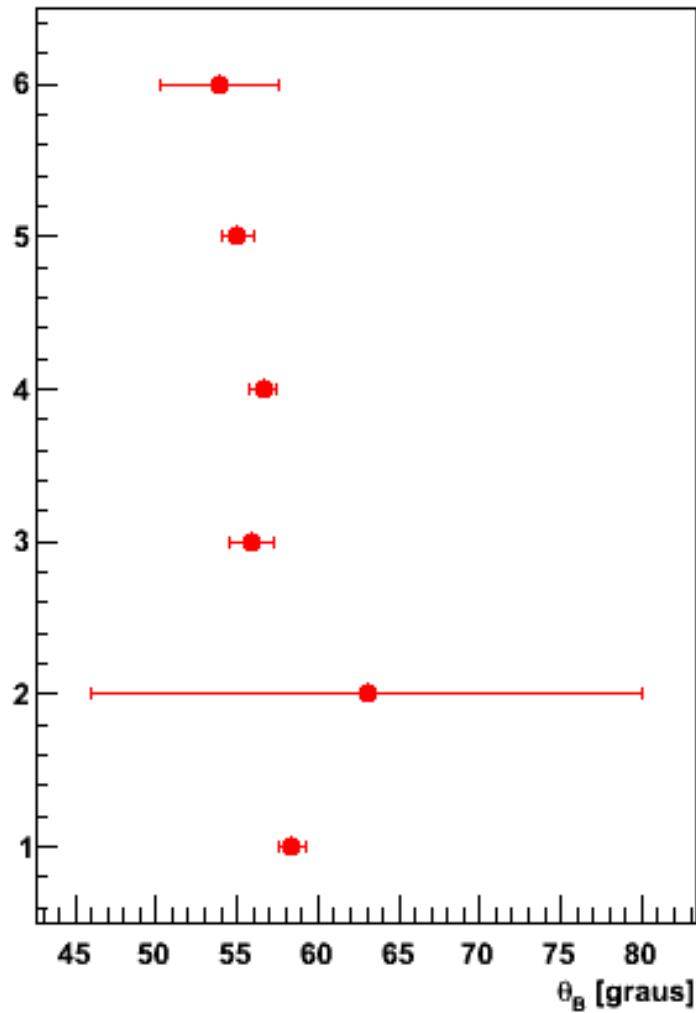
$$R_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)}$$

$$R_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)}$$

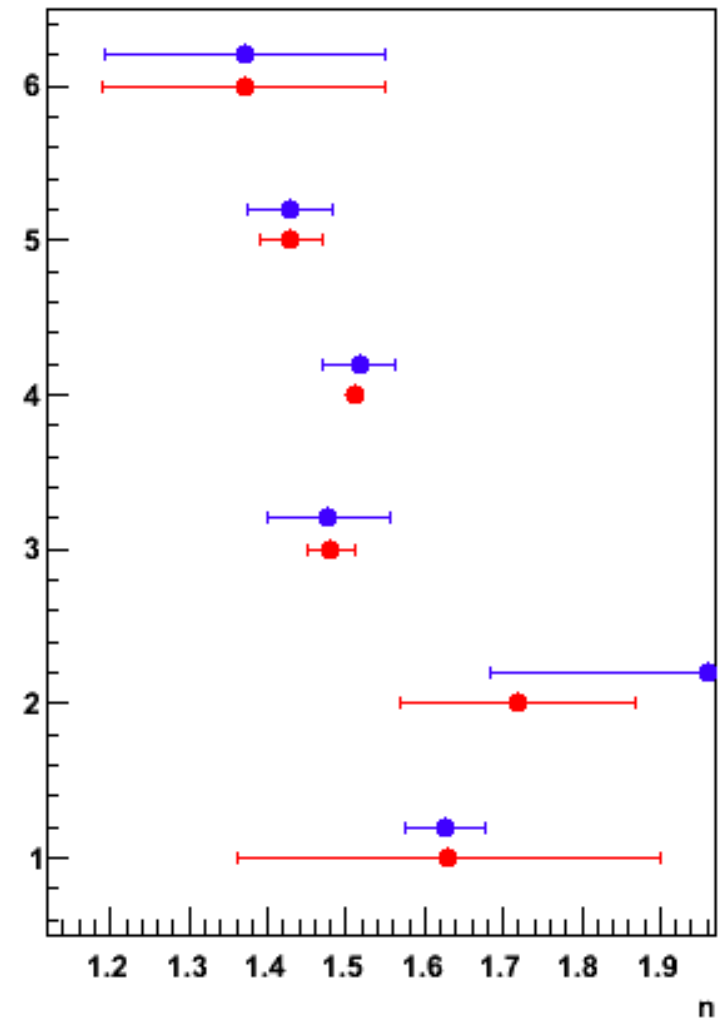
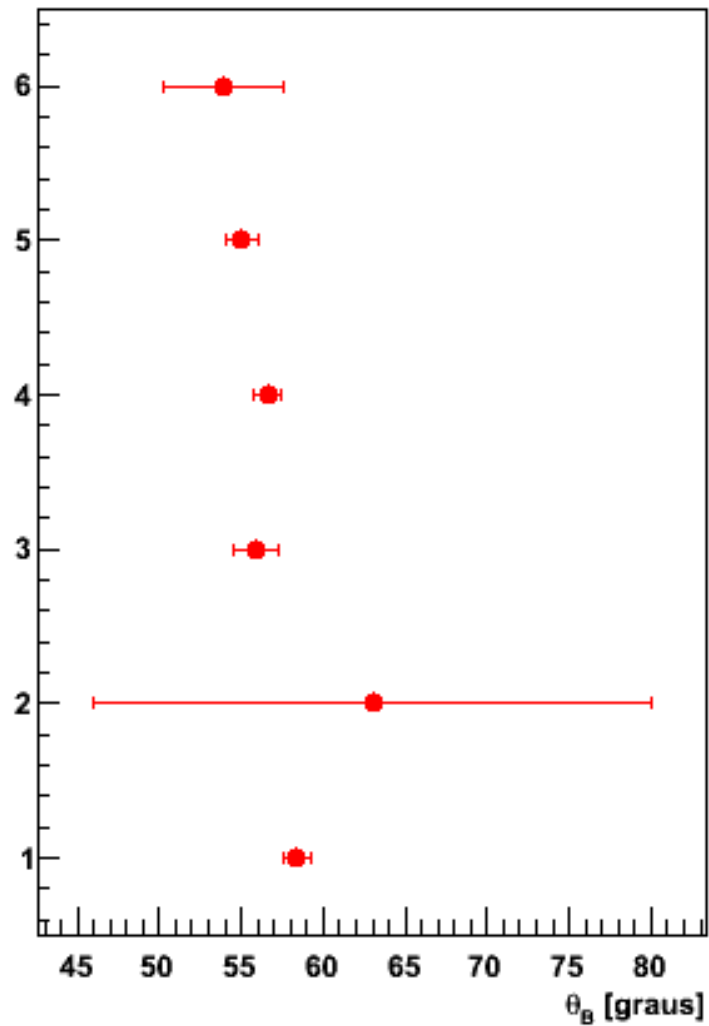




Medidas da turma

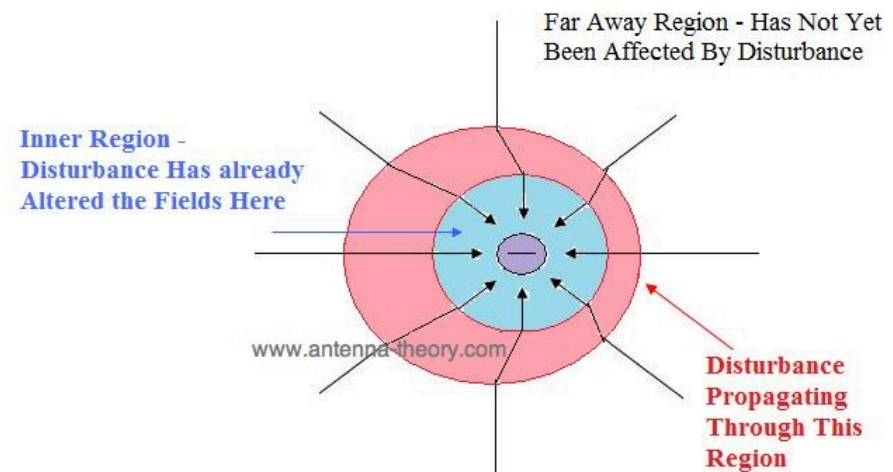
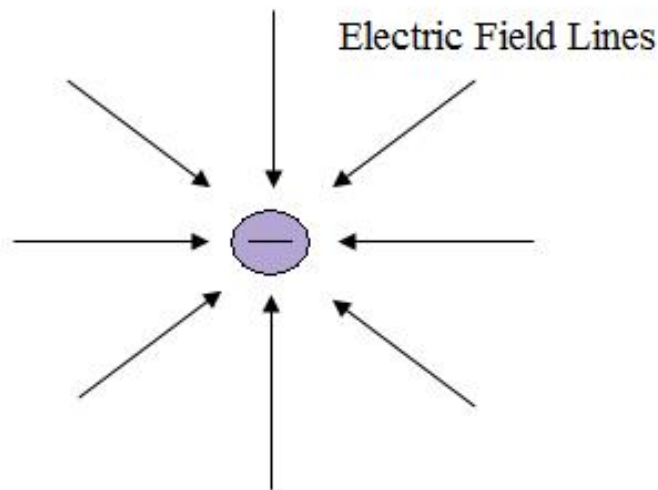


Meus cálculos



Radiação eletromagnética

- Cargas em movimento geram ondas eletromagnéticas (radiação)
 - O movimento da carga gera uma distorção no campo. Essa distorção se propaga com velocidade c .



Equações de Maxwell

- Distorção de E se propagando gera B

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

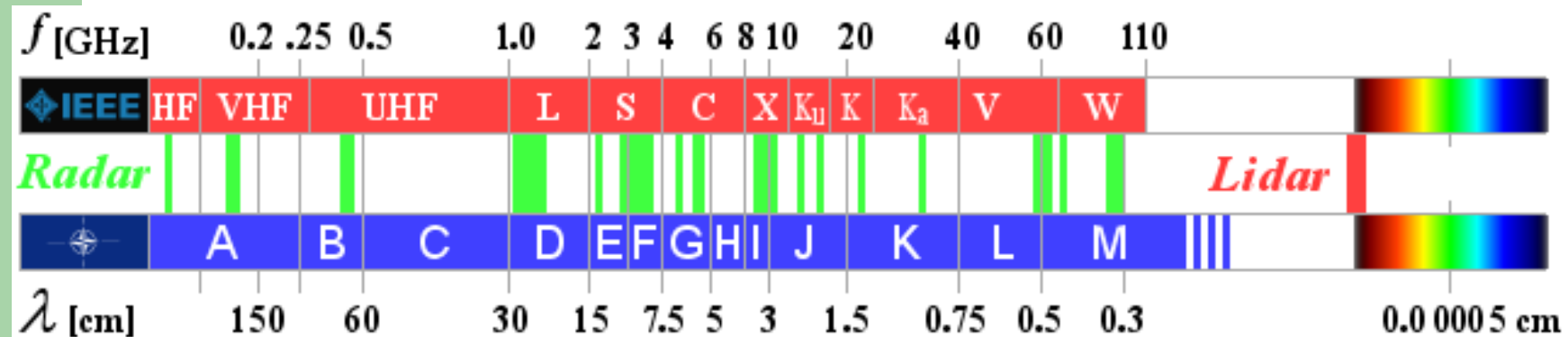
- Distorção é uma onda eletromagnética (exemplo, propagação no eixo-z)
 - Ver apêndice da aula 11 para dedução

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} B_y - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} B_y = 0$$

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} E_x - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} E_x = 0$$

Espectro de frequências

- As características da onda depende da fonte.
 - Frequência, estado de polarização, etc.
 - Micro-ondas
 - $\lambda = 1\text{m}$ a 1mm ► $f = 300\text{MHz}$ a 300GHz



Algumas aplicações



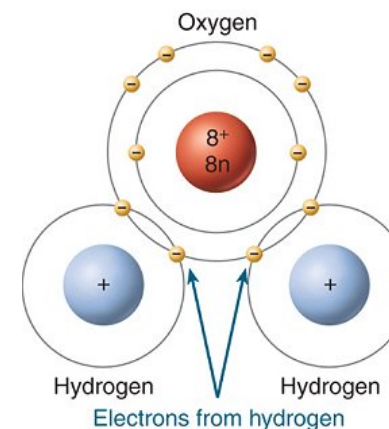
- RADAR

- Grande avanço na IIWW
- Tráfego aéreo, meteorologia, etc.

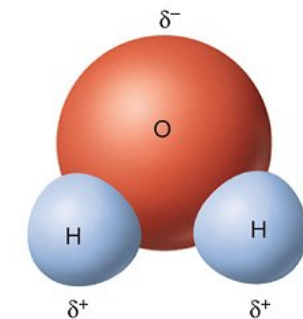


- Aquecimento

- $\lambda \sim 30$ cm
 - Rotação amortecida de mol. água
- Forno é uma cavidade ressonante
 - Modos normais de vibração
 - Experimento do chocolate



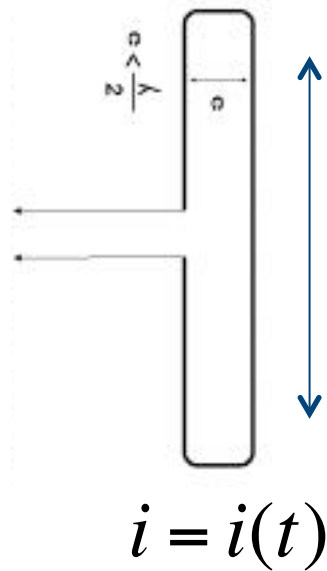
(a) Electron shells in a water molecule



(b) Distribution of partial charges in a water molecule

Dipolo oscilante

- Qual o campo elétrico e magnético gerado por essa corrente?



Potencial vetor

- Para o campo elétrico, a vida ficou fácil quando:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V$$

- E para o campo magnético? Podemos simplificar a nossa vida também?

Potencial vetor

- Equações de Maxwell $\nabla \cdot \vec{B} = 0$
- Lembrem-se de cálculo III $\nabla \cdot (\nabla \times \vec{F}) = 0$
- Podemos, por analogia, definir um potencial vetorial tal que:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$$

- Pois, dessa forma, a equação de Maxwell será sempre satisfeita.

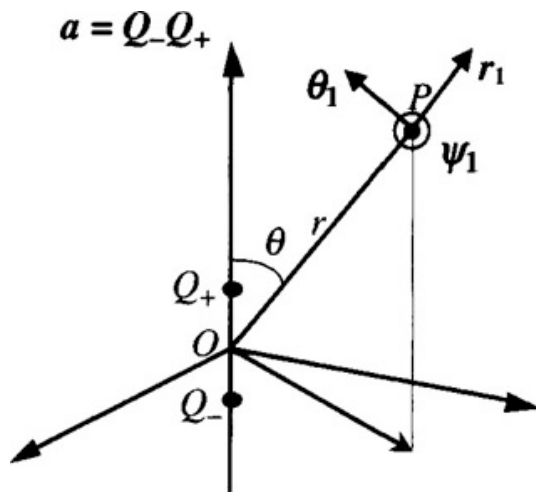
Potencial vetor

- Equações de Maxwell $\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$
- Substituindo $\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \mu_0 \vec{J}$
- Como: $\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla \left(\underbrace{\nabla \cdot \vec{A}}_0 \right) - \nabla^2 \vec{A} = -\nabla^2 \vec{A}$
- Resulta: $-\nabla^2 \vec{A} = \mu_0 \vec{J} \rightarrow \vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J}(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dv'$

Dipolo oscilante (um pouco de matemática)

- Potencial vetor retardado

- Em um instante t a uma distância r , o potencial depende da configuração do dipolo em um tempo t' , anterior a t



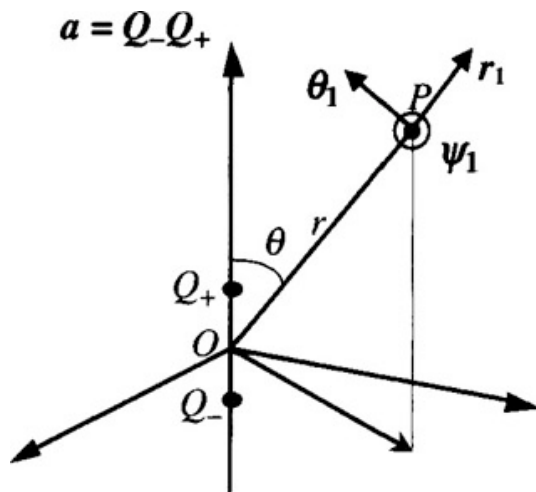
$$\vec{A}(\vec{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J}(\vec{r}', t')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dv'$$

$$t' = t - \frac{|\vec{r} - \vec{r}'|}{c}$$

Dipolo oscilante (um pouco de matemática)

- Como a corrente está no eixo-z

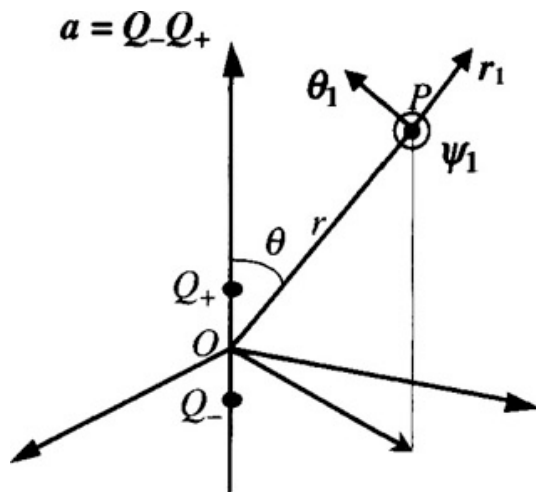
$$A_z(\vec{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-l/2}^{l/2} \frac{i\left(z', t - \left|\vec{r} - z'\hat{k}\right|/c\right)}{\left|\vec{r} - z'\hat{k}\right|} dz'$$



Dipolo oscilante (um pouco de matemática)

- Se l for muito pequeno em comparação com r

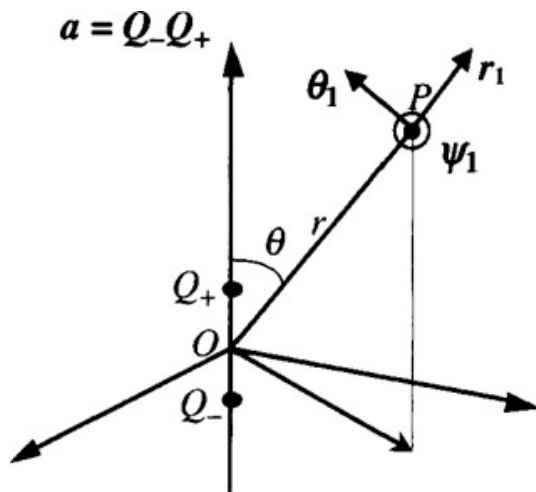
$$\left| \vec{r} - z' \hat{k} \right| = \left(r^2 + z'^2 - 2z' \hat{k} \cdot \vec{r} \right)^{1/2} \sim r - z' \cos \theta$$



Dipolo oscilante (um pouco de matemática)

- Como a corrente está no eixo-z

$$A_z(\vec{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-l/2}^{l/2} \frac{i(z', t - (r - z'\cos\theta)/c)}{r - z'\cos\theta} dz'$$



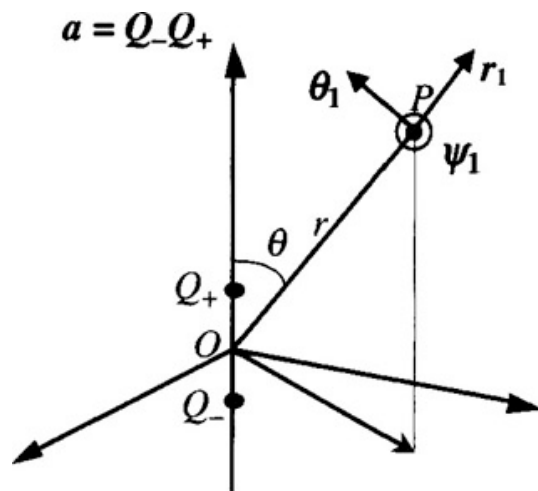
- Como:

$$z'\cos\theta \ll r$$

Dipolo oscilante (um pouco de matemática)

- Como a corrente está no eixo-z

$$A_z(\vec{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{r} \int_{-l/2}^{l/2} i(z', t - (r - z'\cos\theta)/c) dz'$$



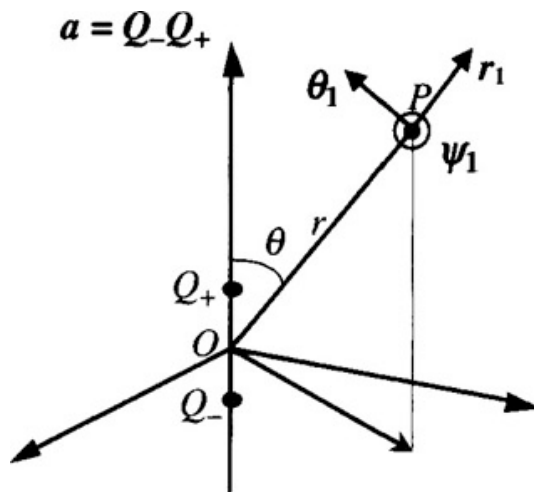
- Se $z'\cos\theta/c$ for desprezível se comparado ao tempo no qual a corrente oscila (período)

$$(r - z'\cos\theta)/c \rightarrow r/c$$

Dipolo oscilante (um pouco de matemática)

- Ou seja:

$$A_z(\vec{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{r} \int_{-l/2}^{l/2} i(z', t - r/c) dz'$$



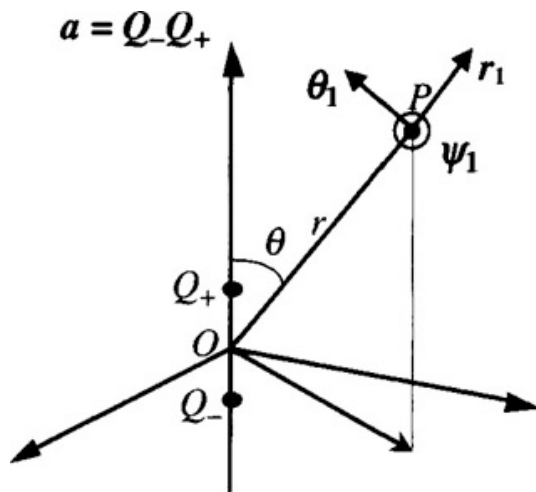
- Como a corrente depende apenas do tempo

$$i = i_0 \cos \omega t$$

Dipolo oscilante (um pouco de matemática)

- Temos:

$$A_z(\vec{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{r} i(t - r/c) l$$



- Sabendo o potencial vetor eu posso determinar o potencial escalar e, consequentemente, os campos

Dipolo oscilante (um pouco de matemática)

- O potencial escalar pode ser obtido de:

$$\vec{\nabla}\vec{A} + \frac{1}{c} \frac{\partial V}{\partial t} = 0$$

- Resolve-se facilmente (façam como exercício):

$$V(\vec{r}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{z}{r^2} \left(\frac{q(t - r/c)}{r} + \frac{i(t - r/c)}{c} \right)$$

Dipolo oscilante (um pouco de matemática)

- O campo elétrico pode ser obtido através de:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi - \frac{\partial\vec{A}}{\partial t}$$

- Pode-se achar que (em coordenadas esféricas):

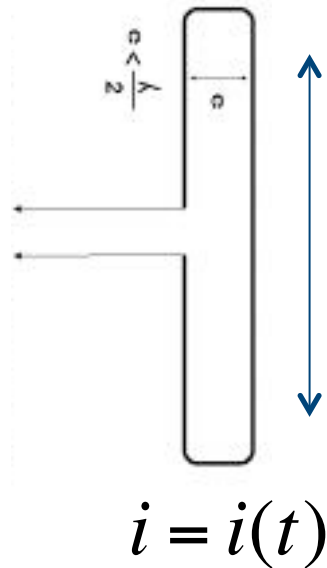
$$z = r \cos\theta \rightarrow \varphi \text{ depende somente de } r \text{ e } \theta$$

$$\vec{A} = (0, 0, A_z) \rightarrow A_\phi = 0$$

$$E_\phi = -\frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial\varphi}{\partial\phi} - \frac{\partial A_\phi}{\partial t} = 0$$

Dipolo oscilante

- Para um dipolo oscilante, o campo elétrico está no plano do dipolo

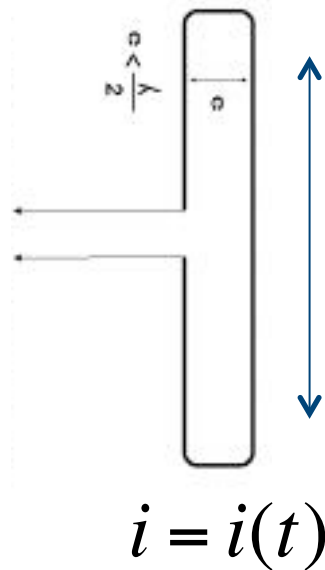


$$E_{\phi} = 0$$

- A onda é linearmente polarizada na mesma direção que o dipolo!

Dipolo oscilante

- A potência média irradiada depende dos campos elétrico e magnético e vale:



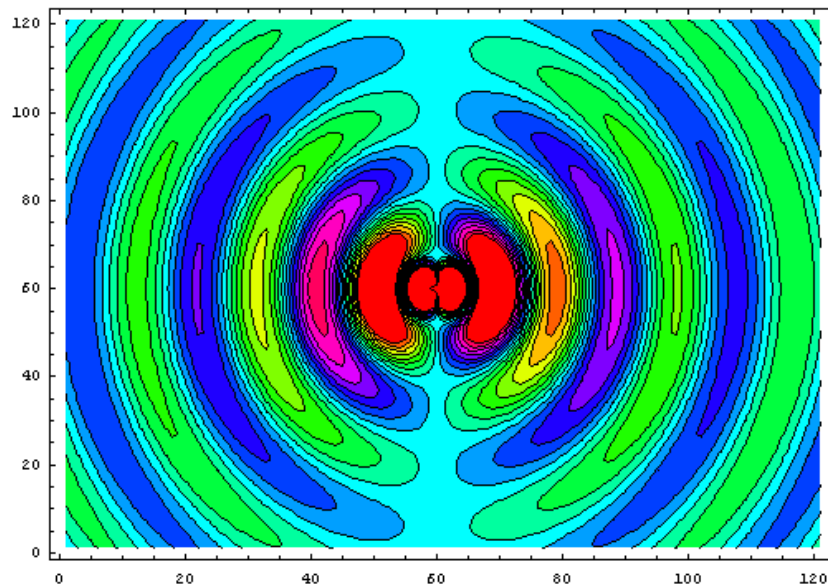
$$P \propto |\vec{E}|^2$$

- Pode-se mostrar que:

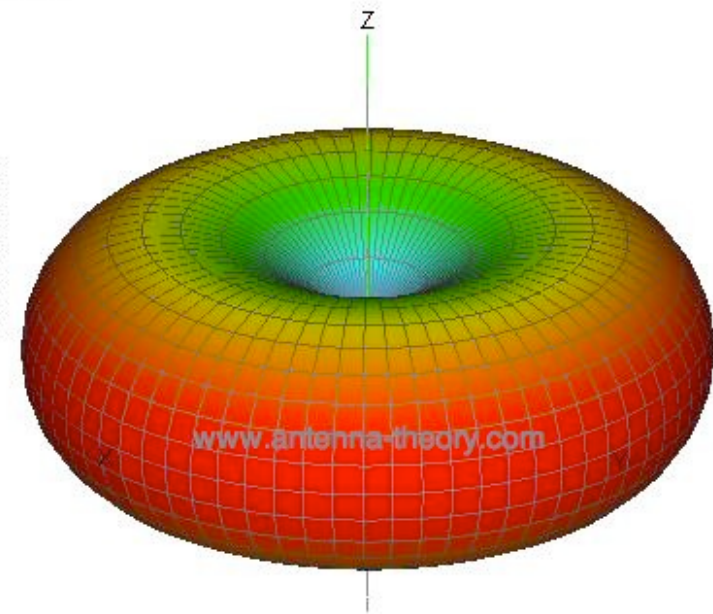
$$P \propto \sin^2 \theta$$

Campo e potência de um dipolo

- Preferencialmente em ângulos próximos de 90°

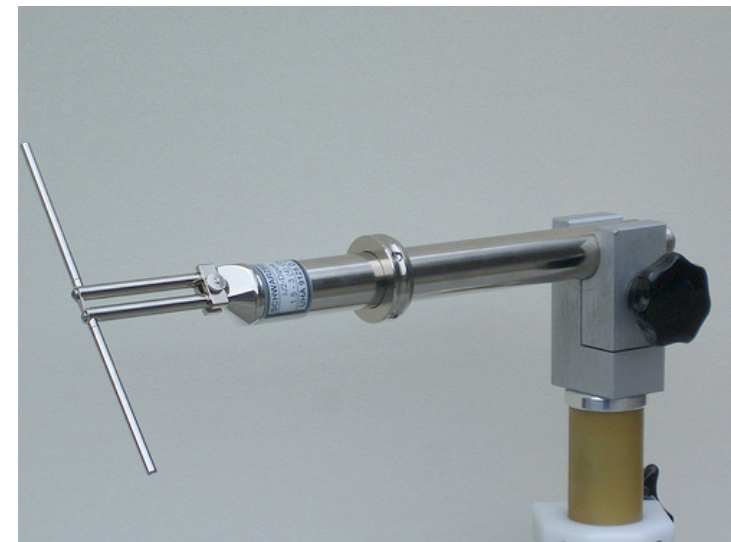


Gain_Tot[dB]



Antena dipolar

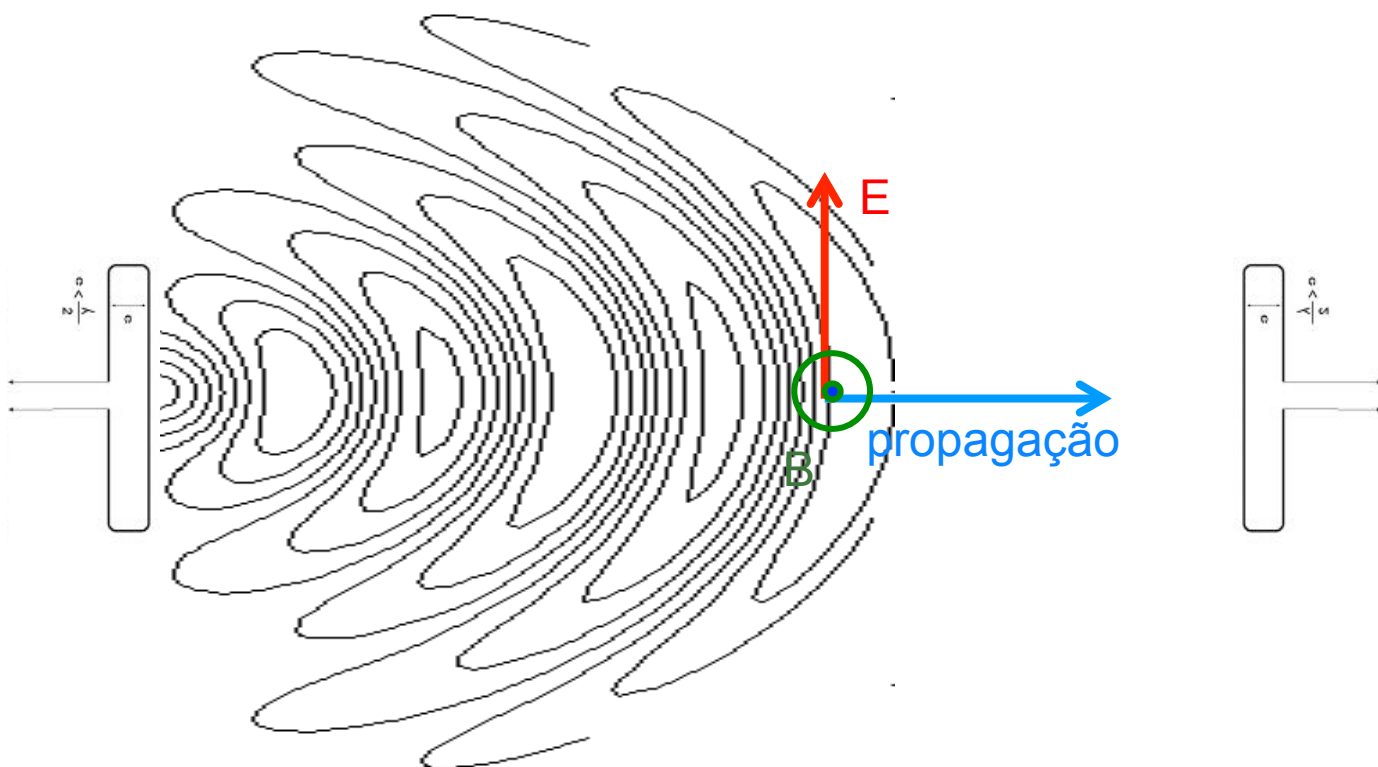
- Princípio similar ao dipolo emissor
- O campo elétrico provoca uma corrente
 - Como a força é na direção do campo, a antena dipolar gera uma corrente proporcional à componente do campo no seu eixo



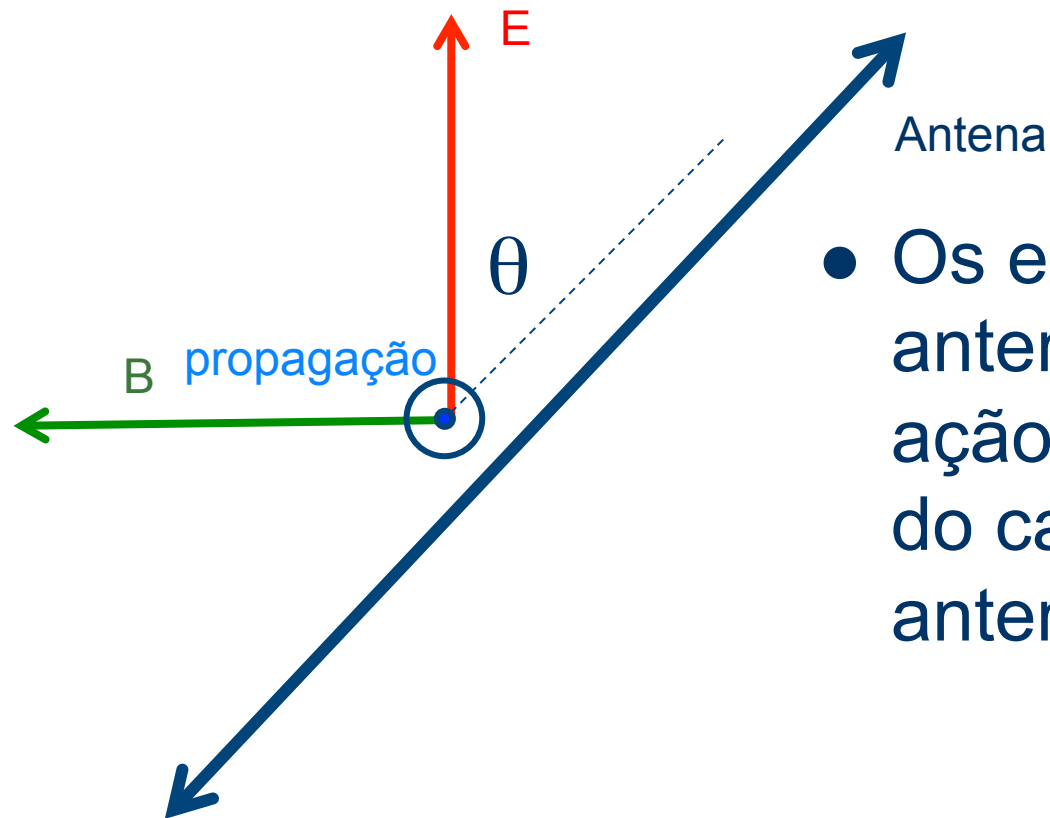
Qual o motivo disso tudo?

- Objetivos dessa semana
 - Estudar efeitos de polarização em micro-ondas
- Gerador e receptor de micro-ondas disponíveis
 - Antenas dipolares

Sistema básico



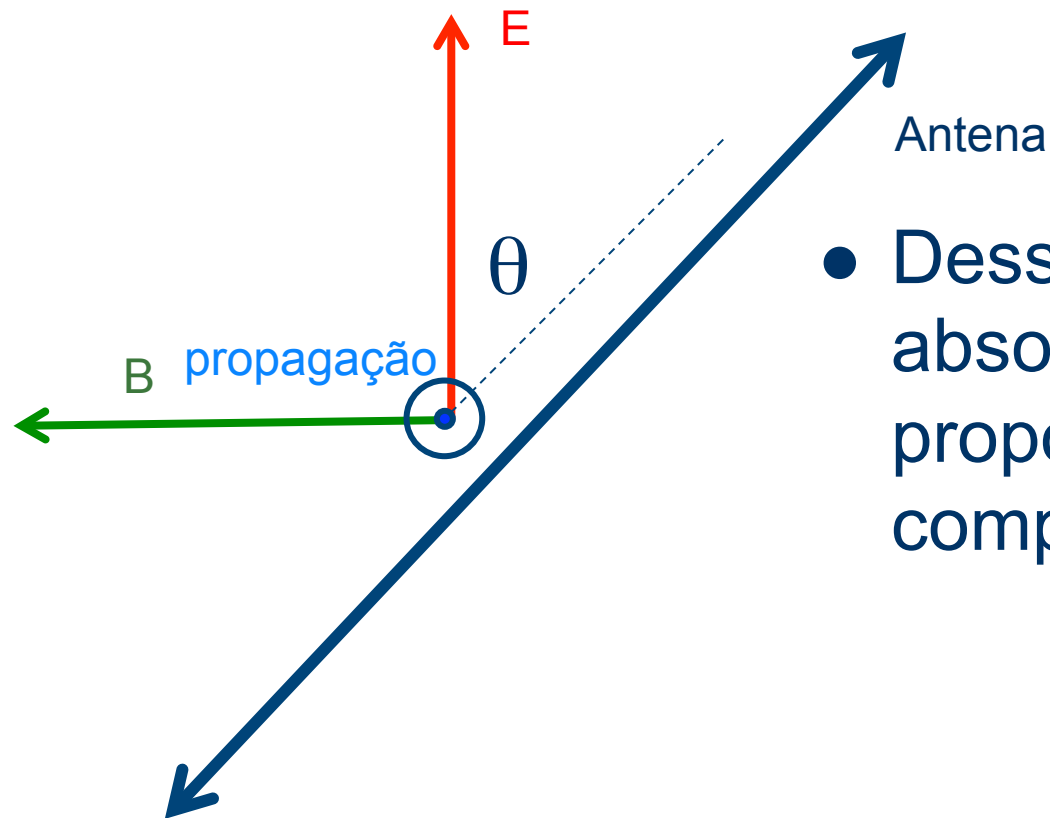
Alinhamento relativo entre emissor e receptor



- Os elétrons na antena sentem a ação da componente do campo no eixo da antena

$$E \cos \theta$$

Alinhamento relativo entre emissor e receptor



- Desse modo, a energia absorvida pela antena é proporcional a essa componente

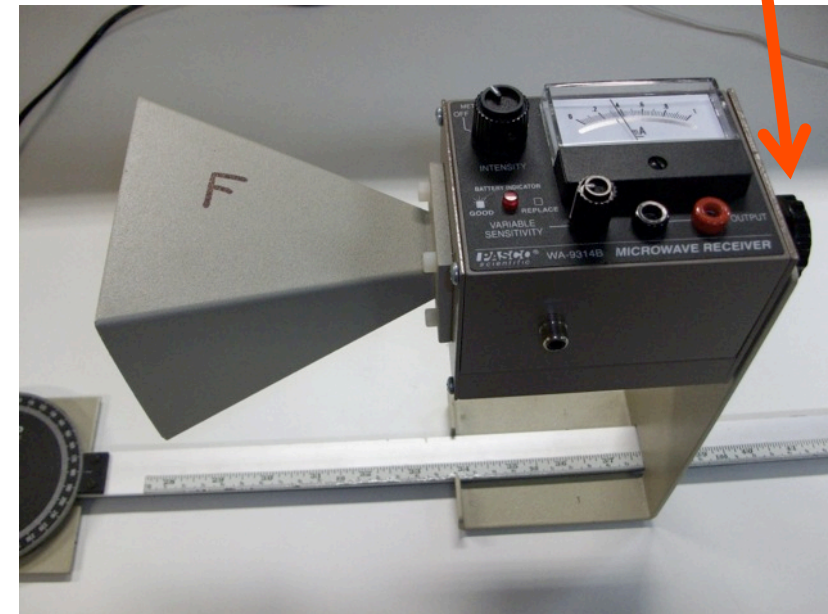
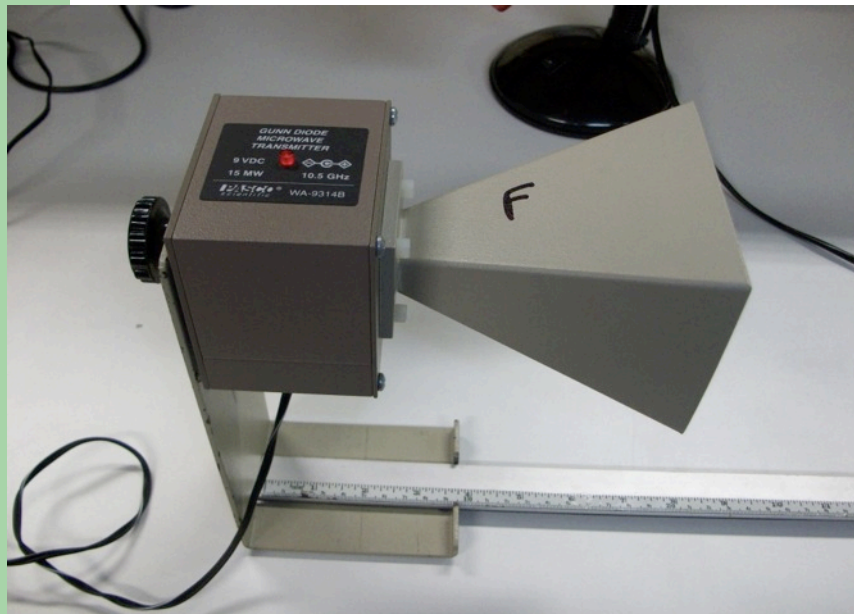
$$I \propto \cos^2 \theta$$

Objetivos da aula de hoje

- Estudar o efeito de polarização de micro-ondas em antenas
 - Transmissor e receptor são dipolos → onda emitida polarizada e receptor atua como polarizador
 - Lei de Malus para antenas de dipolo
- Estudar um sistema de transmissor + polarizador externo + receptor
 - Sistema com polarizações sucessivas
 - Lei de Malus em sequência.

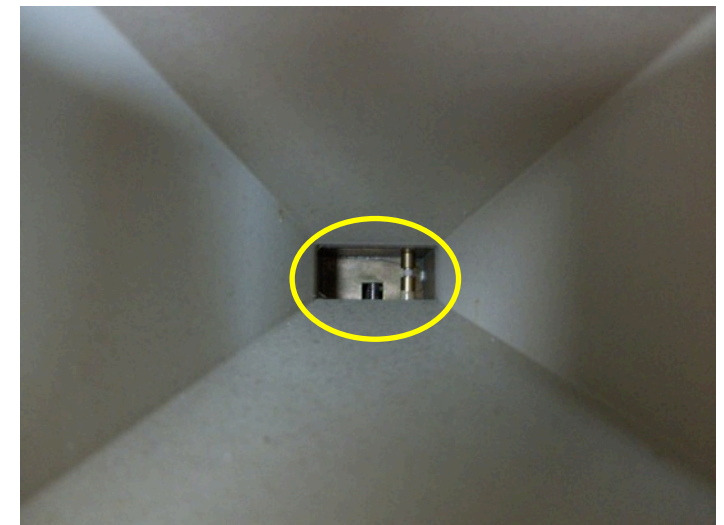
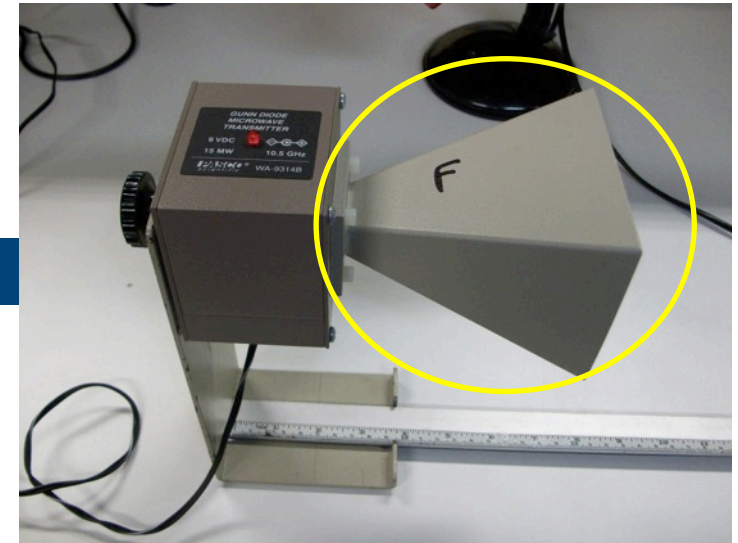
Aparato experimental

- o equipamento da PASCO (WA-9314B) consta de uma antena emissora e outra receptora, que podem girar em torno do eixo e o ângulo é medido numa escala angular + polarizador



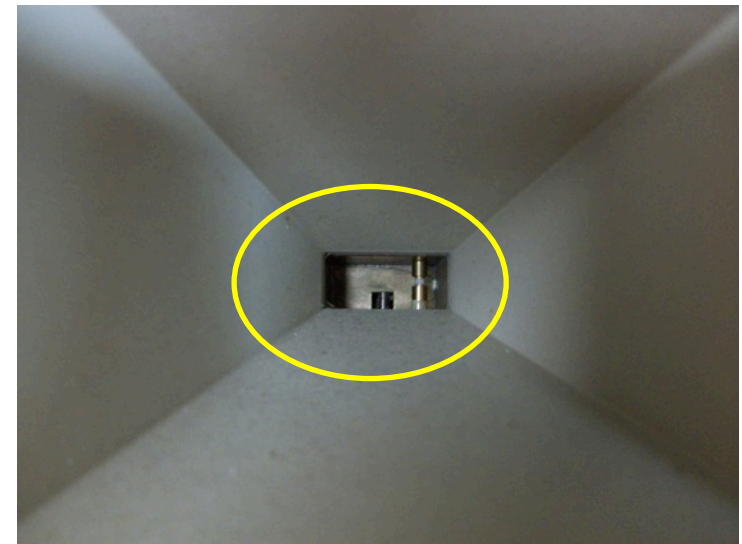
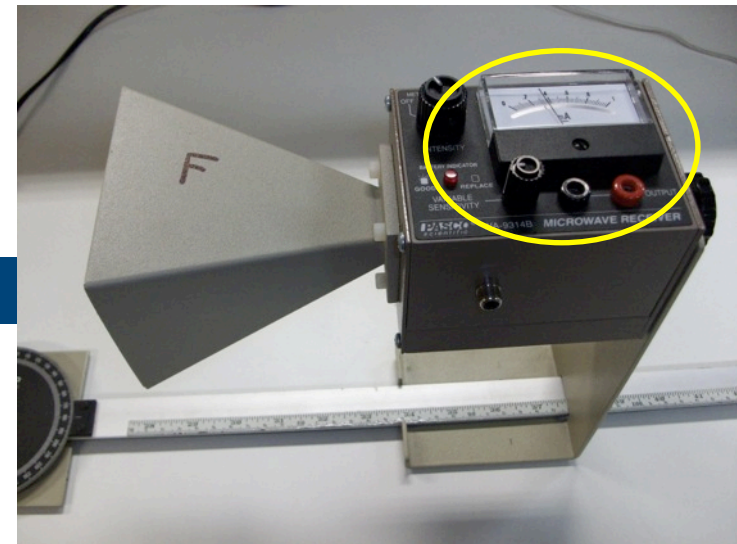
Emissor

- Fornece uma micro-onda de 10,525GHz ($\lambda=2,85\text{cm}$), linearmente polarizada.
 - Um diodo “Gunn”, que funciona como um resistor não linear que oscila na faixa de micro-ondas, é colocado numa cavidade ressonante de 10,525GHz, a onda emitida é polarizada ao longo do eixo do diodo.
 - O “copo” direciona o feixe de micro-ondas irradiado e o centraliza ao longo de seu eixo. Ele é colocado a 18cm de altura para reduzir a reflexão na mesa.



Receptor

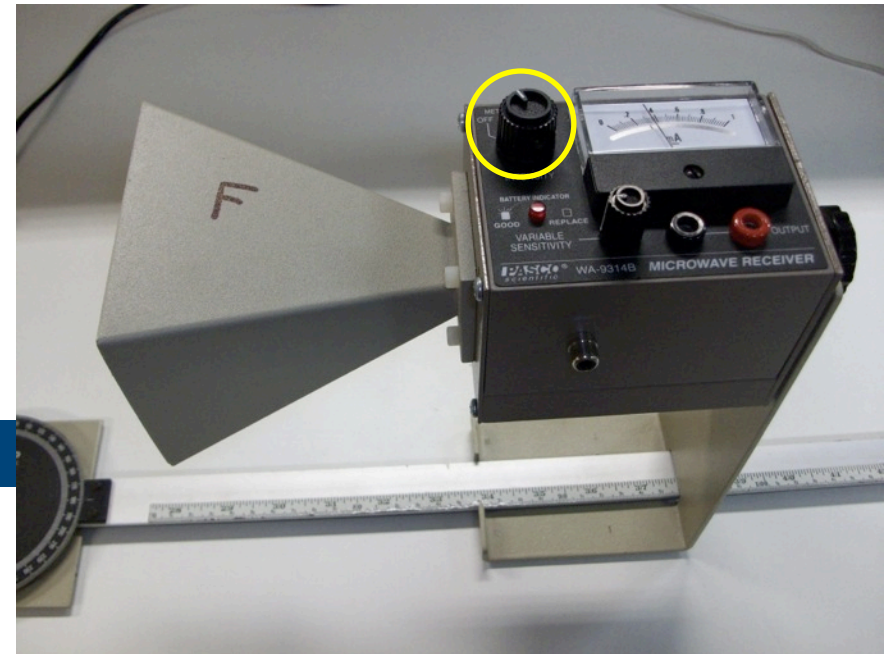
- O “copo” serve de guia onda para um diodo (tipo Schottki) que está numa cavidade ressonante de 10,525GHz. **Ele só deteta a componente da microonda paralela ao seu eixo, produzindo um sinal DC que varia com a magnitude da onda detetada.**



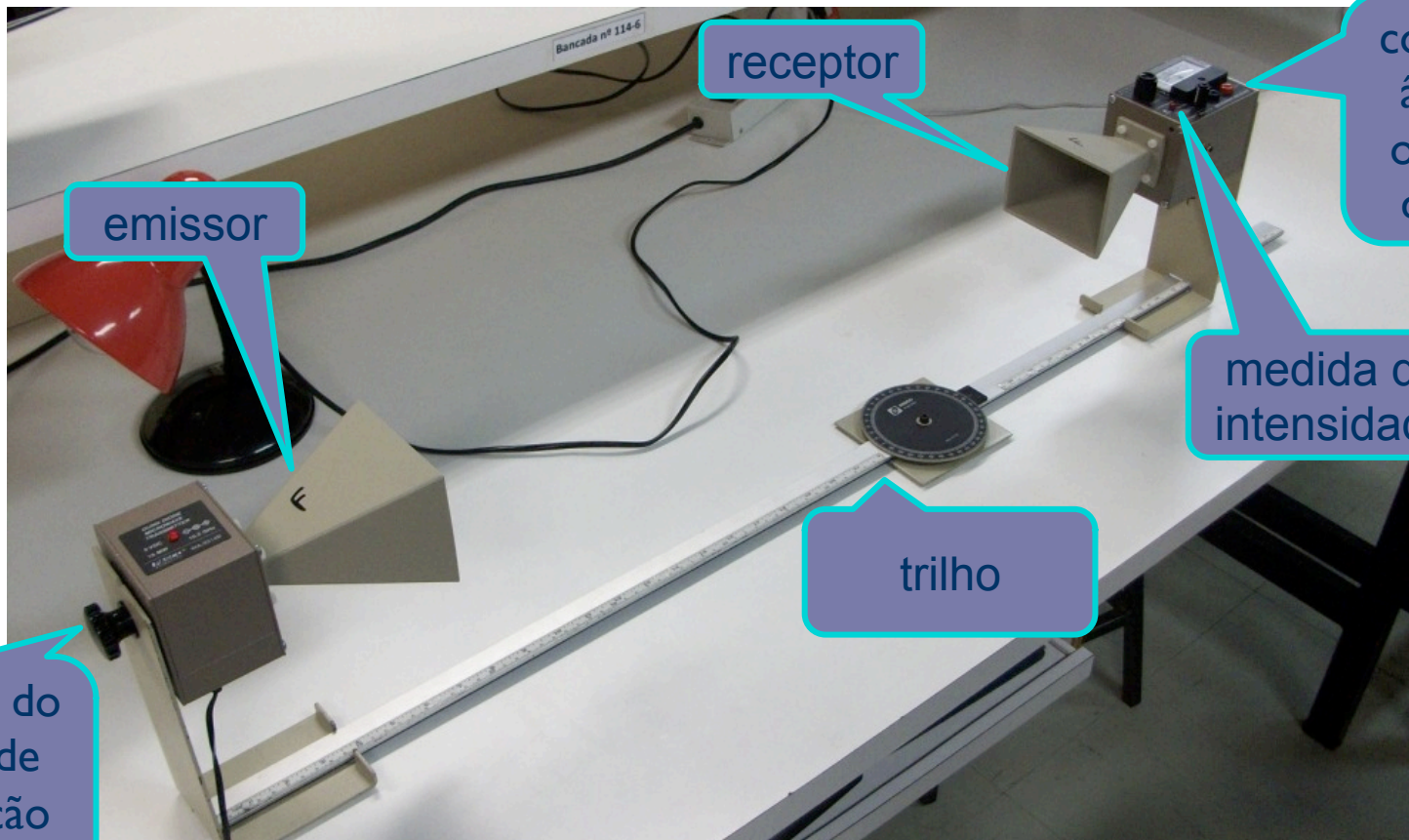
Receptor

- Características

- o receptor tem 4 intervalos de amplificação do sinal: X1, X3, X10, X30, esses valores multiplicam a leitura do medidor.
- ele permite que a antena receptora gire em torno de seu eixo, permitindo a leitura numa escala angular.
 - O transmissor também possui escala graduada de ângulo



A montagem: parte I



emissor

receptor

controle do
ângulo de
orientação
da antena

medida da
intensidade

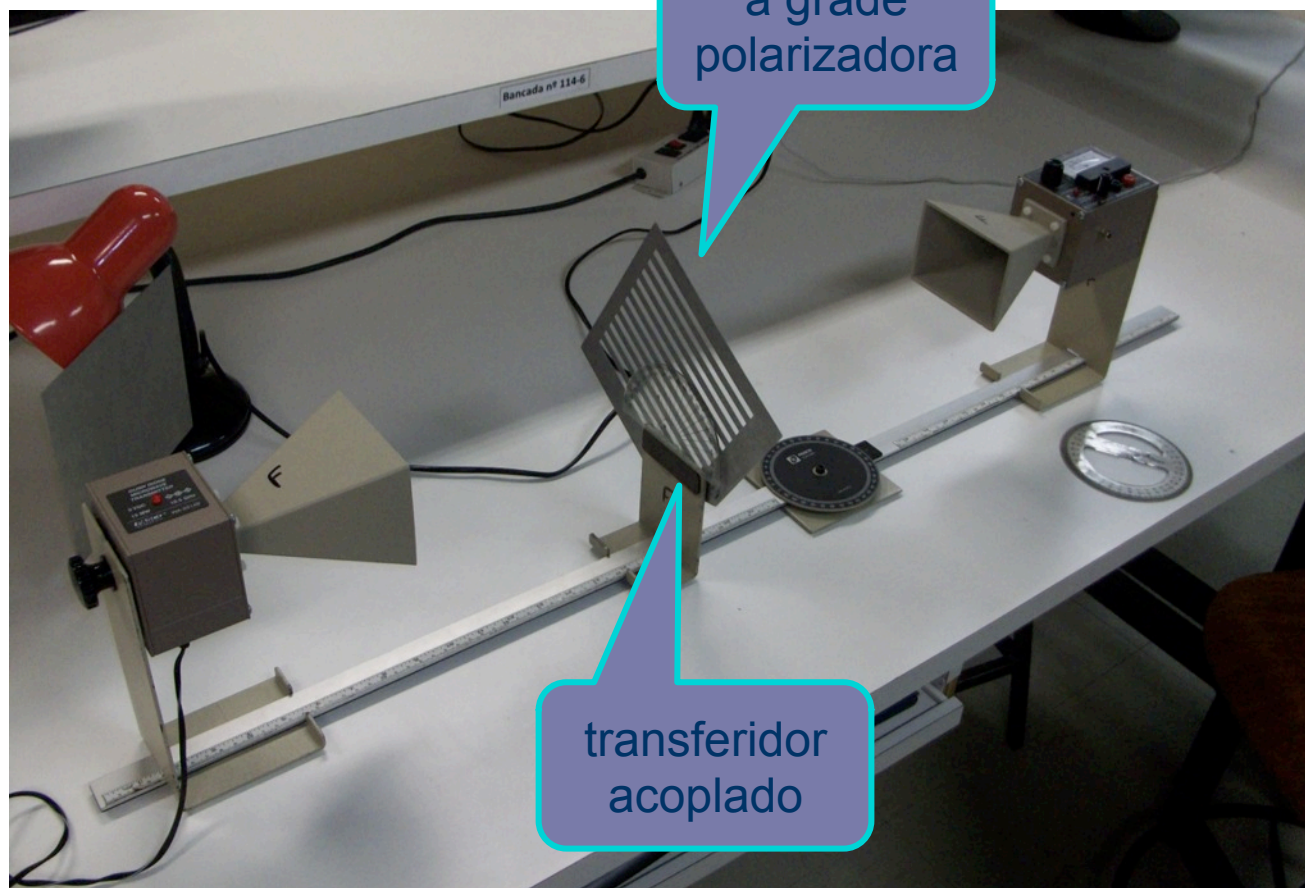
trilho

controle do
ângulo de
orientação
da antena

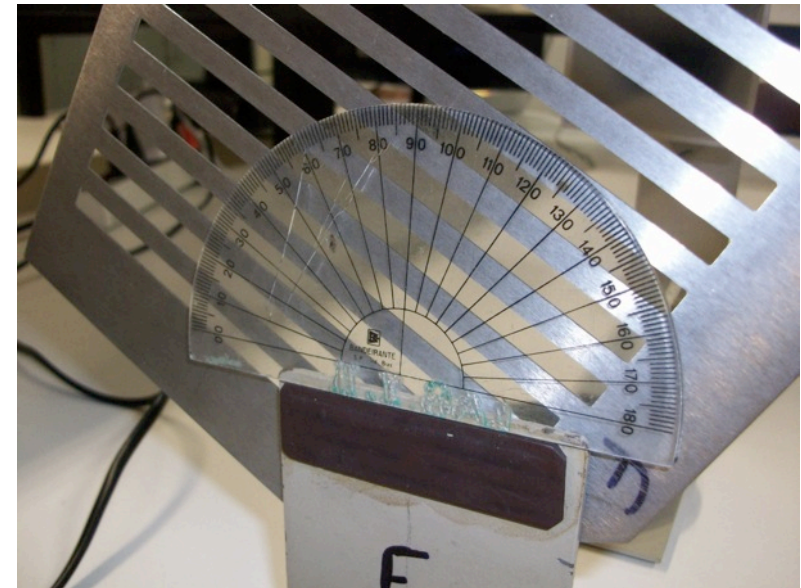
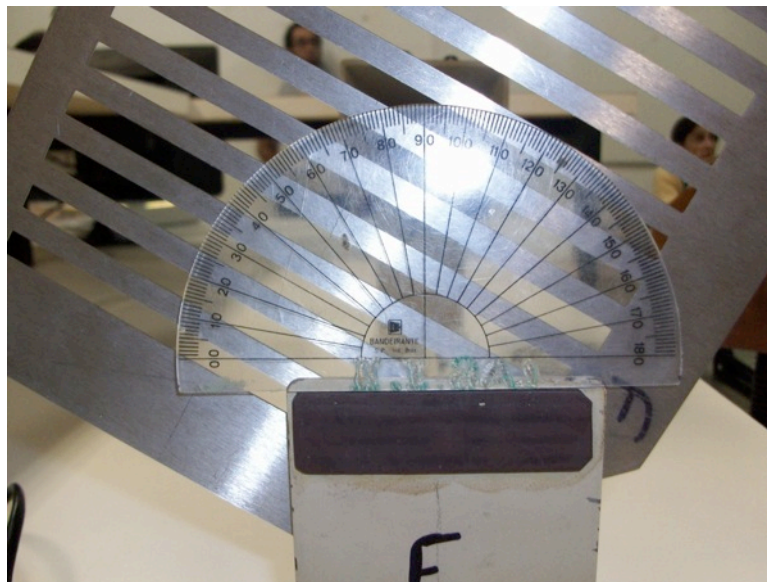
Medidas e análises, parte I

- Verificar a Lei de Malus com micro-ondas:
 - usando somente o emissor e o receptor, verifique a Lei de Malus
 - Decida quantos pontos medir e o intervalo angular
- Ajuste a curva teórica aos dados experimentais
 - Lembre-se que talvez precise de outros parâmetros para obter um bom ajuste. Use o método de mínimos quadrados.
- Cuidado para não receber sinais espúrios de outras bancadas.

A montagem: parte II



Detalhes do polarizador



Medidas e análises, parte II

- Agora fixe o transmissor e o receptor alinhados (sinal de intensidade máximo)
 - coloque a grade, acoplada a um transferidor, entre o transmissor e o receptor
 - meça a intensidade transmitida em função do ângulo da grade polarizadora
 - deduza a expressão esperada para a intensidade medida em função do ângulo da grade.
 - ajuste a sua previsão teórica à curva de intensidade em função do ângulo obtida.
 - Ajuste por mínimos quadrados com os parâmetros necessários.
 - explique o que observou.